

## 소프트 컴퓨팅 기법을 이용한 이족 로봇의 지능적 보행

## Intelligent walking of a biped robot using soft-computing method

이선구, 송희준, 김동원, 서삼준, 박귀태

(Seongu Lee, Heejun Song, Dongwon Kim, Sam-Jun Seo, and Gwi-Tae Park)

**Abstract** - Researches on biped robot walking have been mostly focusing on walking on even surfaces. Therefore, robot walking has been only realized on pre-specified spaces with pre-specified movements according to the previous researches. In this paper a walking system for a biped robot using fuzzy system and neural networks to overcome those constraints. The system enables biped walking to be possible in various environments and with more complicated obstacles. For the purpose, a walking robot should recognize its surrounding environment and determine its movement.

In the proposed system, a robot dynamically generates its walking trajectories of each joint by using neural networks when facing new obstacle such as stairs, and it maintains its walking stability by using closed loop fuzzy control system which manipulates the waist joints.

**Key Words** : Biped robots, fuzzy system, neural networks

## 1. 서 론

70년대 후반부터 발전하기 시작한 이족 로봇의 연구는 평지에서의 보행에 관한 연구가 주를 이루었다. 현재는 평지에서뿐만 아니라 비평지, 경사면과 같은 특수한 상황 하에서의 보행이 연구되고 있지만, 대부분 여러 가지 제약 조건이 따르고 있다. 그래서 지정된 장소에서 미리 계획된 동작이 수행될 수밖에 없다[1-3].

본 논문에서는 이러한 제약 조건을 극복하기 위해서 퍼지 시스템 및 신경망을 이용한 지능적 보행에 관한 연구를 하고자 한다. 즉, 이족 보행 로봇이 복잡한 환경에 적용되어 다양한 작업을 수행 할 수 있도록 비평지, 경사면, 계단에서의 보행뿐만 아니라 다양한 형태의 장애물을 회피하여 주어진 미션을 수행 할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 이족 로봇이 보행 시에 부딪치는 다양한 환경을 스스로 인지하고 적절한 동작을 스스로 결정함으로써 제약조건 없이 주어진 미션을 수행할 수 있다. 이는 크게 두 가닥의 연구로 구분될 수 있다.

첫 번째는 로봇의 안정적인 보행을 위한 보행 궤적[5] 생성에 관한 연구이다. 초음파 센서, 적외선 센서, 압력 센서, 자이로 및 비전을 이용해서 이족 로봇 내부 및 주변에 대한 상황을 인지하여 로봇이 안정적으로 보행 할 수 있는 로봇 하체의 궤적을 생성하는 것이다. 실제로 복잡한 환경 하에서

는 기구학을 이용하여 실시간으로 궤적을 생성하기란 매우 어렵기 때문에 본 논문에서는 신경망 학습을 통해서 이를 극복하려고 한다. 각 센서의 정보를 받아서 신경망으로 한 스텝에 대한 발목 및 허리의 초기, 중간, 끝 위치를 구하면 이를 보간법(Polynomial)을 이용해서 허리 및 발목에 대한 전체 궤적을 구한다. 무릎 궤적은 역기구학을 이용해서 구할 수 있다.

두 번째는 미지의 환경 하에서의 장애물 등에 대처하기 위한 자세 제어에 관한 연구이다. 이족 로봇이 보행 궤적을 따라 동작을 수행 할 때, 노면의 상태나, 기구 부 및 센서의 오차 등으로 인해서 에러(외란)이 발생하게 된다. 이를 극복하기 위해서 본 논문에서는 이족 로봇의 상체를 이용하여 에러에 대한 보정을 하였다. 이때 실시간으로 피드백을 하기 위해서 퍼지 시스템을 적용하였다.

위에서 언급한 이족 로봇의 보행 궤적 생성 및 자세 제어를 통해서 이족 로봇은 로봇 내부 및 외부에 대한 상황을 스스로 인지하여 적절한 동작을 수행 할 수 있다. 이를 검증하기 위해서 22자유도와 초음파, 적외선, 자이로, 및 압력 센서를 갖춘 소형 이족 로봇을 제작하였다. 실험은 비평지, 경사면 및 계단에서의 보행을 실험하고 있다. 로봇이 주변 상황에 따라 스스로 판단하고 적절한 동작을 수행한다면, 이족 로봇은 인간의 실 환경 하에서도 제약 조건 없이 지능적 보행이 가능 할 것이다.

## 2. 지능적 보행을 갖춘 로봇 시스템

## 2.1 소형 이족 로봇 시스템.

본 논문에서 제안하는 이족 로봇의 지능적 보행 시스템을 검증하기 위하여 20자유도(DOF)를 갖는 이족 로봇을 아래와 같이 설계하였다.

\* 이선구, 송희준: 高麗大學校 電氣工學科 碩士課程

\*\* 김동원: 高麗大學校 電氣工學科 博士課程

\*\*\* 서삼준: 安養大學 電氣電子工學科 副教授·工博

\*\*\*\* 박귀태: 高麗大學校 電氣工學科 正教授·工博

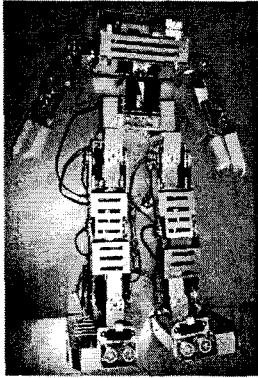


그림 1. 제작된 이족 로봇

제작된 로봇은 총 46cm이며, 로봇에 장착된 서보 모터 및 센서들을 제어하기 위해서 TMS320LF2407 프로세서[6]를 사용하였다. 또한 로봇은 HSR-8498HB 서보 모터 14개 와 HSR-5995TG 서보 모터 6개로 총 20개서보 모터로 구성되어 있다. HSR-8498HB의 정지 토크(Stall Torque)는 7.4V 입력 전압에 9.0kg/cm이며, HSR-5995TG의 정지 토크는 7.4V 입력 전압에 30kg/cm이다. 그래서 이족 로봇이 보행 시 큰 토크가 걸리는 관절인 허리의 Roll 축, 발목의 Roll 축과 Pitch 축은 HSR-5995TG RC 서보 모터로 구성되어 있으며 나머지 관절은 HSR-8498HB RC 서보 모터로 구성되어 있다.

HSR-8498HB와 HSR-5995TG RC 서보 모터는 엔코더가 없기 때문에 실제 모터의 회전 각도를 센싱할 수 없다. 그래서 주 제어기에서 모터로 보내주는 신호만으로는 로봇의 실제 자세를 알 수 없다. 이를 극복하기 위해 로봇의 허리 부위에 myGyro150EB 자이로 센서 2개(x축, y축)를 장착하였다. myGyro150EB는 최대  $\pm 150/s$  까지 측정이 가능하기 때문에 자이로 센서를 이용하면 로봇의 보행 시 상태(자세)를 알 수 있다.

로봇의 발바닥 앞쪽에는 적외선 센서와 초음파 센서를 장착하였다. 이는 로봇이 보행 시 장애물을 만나게 되면 이를 감지하여 장애물과의 충돌을 회피하기 위함이다. 적외선 센서는 GP2D120을 사용했으며 측정 범위는 4cm-30cm로 근거리 측정에 사용되었다. 초음파 센서는 40Khz를 이용하며 3cm-3M까지 측정이 가능하여 원거리에 있는 장애물 감지에 사용되었다.

로봇의 보행 시 안정도를 평가하기 위해 ZMP(Zero Moment Point)[4]를 이용하였다. 실제 로봇시스템에서 실시간으로 ZMP를 계산하기란 어렵기 때문에 본 논문에서는 FSR 센서를 이용하여 ZMP를 측정하였다. 사용된 FSR은 FlexForce 압력센서(25LB)로써 0kg~11kg까지 측정이 가능하다. 로봇의 보행을 위한 구체적인 시스템은 다음 절에서 설명하겠다.

## 2.2 신경망을 이용한 이족 로봇의 궤적 생성

로봇의 지능적 보행(Intelligent Walking)을 구현하기 위해서는 학습 능력을 갖추어야 하기 때문에 다층 신경망을 이용하여 로봇의 보행 궤적을 생성하였다.

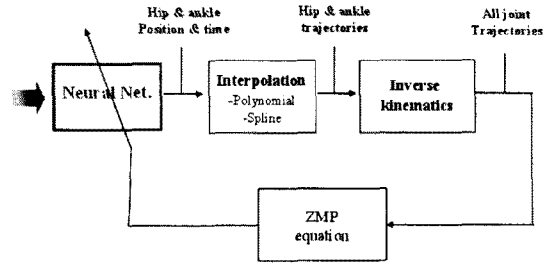


그림 2. 궤적 생성

뉴럴넷의 입력으로는 로봇의 보행 방향, 경사면 각도, 장애물 종류, 로봇 상태(자세)를 수치화 해서 사용하였다. 뉴럴넷의 출력으로는 로봇의 다음 스텝에 대한 정보를 출력한다. 만약, 출력으로 로봇의 모든 관절에 대한 정보(좌표)를 출력하면 뉴럴넷의 출력 노드가 많아지게 되어 출력에 대한 신뢰성이 떨어질 수 있고 연산 부하가 커지게 되므로 허리(Pitch)와 발목(Pitch)에 대한 시작점, 중간 점, 끝점에 대한 각각의 좌표와 시간을 출력한다. 뉴럴넷에 의해 출력된 허리(Pitch) 및 발목(Pitch 좌, 우)의 X축 정보 9개, Y축 정보 9개, Z축 정보 9개를 이용하여 보간법(Interpolation)으로 한 스텝에 대한 허리(Pitch) 및 발목(Pitch 좌, 우)의 전체 궤적을 만들 수 있다. 본 논문에서는 6차 다항식(Polynomial)을 이용하여 궤적을 생성하였다.

아래 그림 3-10 은 허리높이 270mm, 보폭 70mm, 발목의 높이 40mm, 보행 주기 1 sec 일 때의 궤적을 나타낸 것이다.

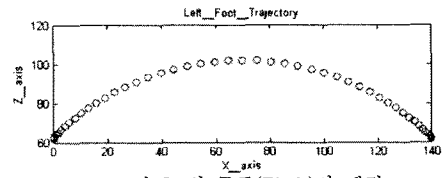


그림 3. 왼 무릎(Pitch)의 궤적

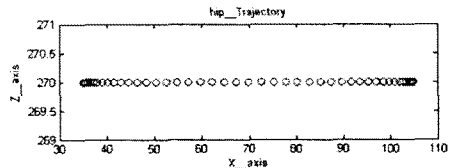


그림 4. 허리(Pitch)의 궤적

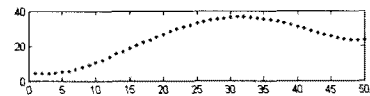


그림 5. 왼쪽 발목(Pitch)의 궤적

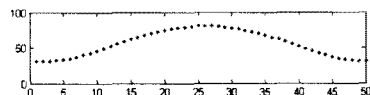


그림 6. 왼쪽 무릎(Pitch)의 궤적

그림 7. 왼쪽 허리(Roll)의 궤적

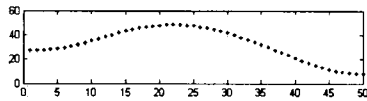


그림 8. 오른쪽 발목(Pitch)의 궤적

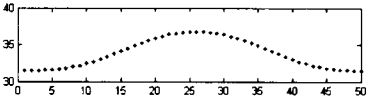


그림 9. 오른쪽 무릎(Pitch)의 궤적

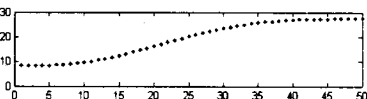


그림 10. 오른쪽 허리(Roll)의 궤적

그림 3, 4는 왼쪽 발목(Pitch)의 궤적과 허리(Pitch)의 궤적을 나타낸 것이다. 그림 5, 6, 7은 왼쪽 발목(Roll)의 궤적, 왼쪽 무릎(Pitch)의 궤적과 왼쪽 허리(Roll)의 궤적을 나타낸 것이다. 그림 8, 9, 10는 오른쪽 발목(Roll)의 궤적, 오른쪽 무릎(Pitch)의 궤적과 오른쪽 허리(Roll)의 궤적을 나타낸 것이다.

그림 2에서 보이는 것처럼, 허리(Pitch) 및 발목(Pitch)의 궤적을 알면, 나머지 관절에 대해서는 역기구학(Inverse Kinematics)을 이용하여 구할 수 있다. 이렇게 구한 보행 궤적의 유효성을 평가하기 위해서 ZMP 방정식을 이용하였으며, 그 결과를 토대로 뉴럴넷의 가중치를 업데이트 함으로써 ZMP 방정식을 만족하는 궤적을 생성할 수 있다. 이렇게 학습을 통해서 ZMP를 만족하는 궤적을 생성하는 데는 많은 시간이 소요 된다. 그래서 뉴럴넷 학습은 DSP상에서 하지 않고 PC상에서 Matlab를 이용하여 생성하였다. 이렇게 구한 로봇의 보행 궤적은 실제 로봇의 DSP(Digital Signal Processor)를 통해 구현되었다. 즉, 학습된 뉴럴넷의 정보(가중치)를 실제 DSP에 그대로 적용하기 때문에 DSP상에서 로봇 주변의 상황에 맞는 궤적을 실시간으로 생성할 수 있다. 이때 뉴럴넷은 학습 모드가 아닌 테스트 모드로 동작을 한다. 그렇기 때문에 뉴럴넷의 실제 입력 값은 실시간으로 센싱된 데이터가 이용되었다.

### 2.3 퍼지 시스템을 이용한 이족 로봇의 실시간 자세 제어

로봇이 실시간으로 생성된 궤적을 따라 정확하게 동작을 한다면 로봇은 안정적인 보행을 할 수 있다. 하지만, 실제로는 기구부의 오차, 노면의 마찰력 등으로 인하여 실제 궤적을 따라 가기는 어렵기 때문에 안정적인 보행을 보장할 수 없다. 그래서 기구부의 오차, 노면의 마찰력, 센서의 부정확성 등을 보상하기 위해서 본 논문에서는 퍼지[7]를 이용하여 이족 로봇의 실시간 자세 제어를 하였다.

그림 11에서 보이는 뉴럴넷은 Matlab를 통해 학습된 가중치를 갖는다. 외란에 대한 보상은 FSR과 자이로 센서 데이터를 기반으로 퍼지 시스템을 적용하여 외란에 대한 오차를 최소화 하였다. 퍼지 시스템에서의 출력은 로봇의 허리(Pitch, Roll) 및 발목(Pitch) 관절 값이다. 즉, 로봇의 허리와 발목 관

절을 이용하여 외란에 대한 보상을 하였다.

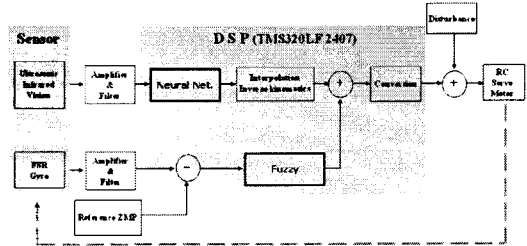


그림 11. 이족로봇 제어 시스템

### 3. 결론

이족 로봇이 복잡한 환경에 적용되어 다양한 작업을 하기 위해서는 이족 보행 로봇의 지능적 보행이 필수적으로 요구된다. 본 논문에서는 이족 로봇이 로봇 주변의 상황을 스스로 인지하여 적절한 동작을 결정함으로써 제약 조건 없는 지능적 보행이 가능할 시스템을 제안 하였다. 특히, 지능적 보행을 위해 유연성 있는 궤적 생성은 신경망을 이용하였으며, 이족 로봇의 실시간 제어를 위해서는 퍼지시스템을 적용하였다. 하지만, 본 논문에서는 소형 이족로봇에 제어 시스템을 적용하였지만, 실제 인간과 같은 크기의 이족 보행 로봇에 적용하여 제안한 시스템을 검증해야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구(R01-2005-000-11044-0) 지원으로 수행된 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] 임선호, 조정산, 이수영, 안희욱, 성영휘, "소형 2족 보행 로봇의 지능형 동작의 구현", 제어자동화시스템공학회는 문지, 1225-9845, 제10권9호, pp.825-832, 2004.
- [2] J. H. Park, H. C. Cho, "An on-line trajectory modifier for the base link of biped robots to enhance locomotion stability," Proc. of Int. Conf. On Robotics and Automation, pp. 3353-3358, 2000.
- [3] F. Kanehiro, et. al. "Development of a remotebrained humanoid for research on whole body action," Proc. Of Int. Conf. On Robotics and Automation, pp. 1302-1307, 1998.
- [4] Dongwon Kim, Sam-Jun Seo, and Gwi-Tae Park, "Zero moment point trajectory modeling of biped walking robot using adaptive neuro-fuzzy system," IEE Proc.-Control Theory Appl., vol. 152, no. 4, pp. 411-426, July 2005..
- [5] Ito, D., Murakami, T., Ohnishi, K., "An approach to generation of smooth walking pattern for biped robot", Advanced Motion Control, 2002. 7th International Workshop on pp. 98-103 2002.
- [6] 김동윤, 예제로 배우는 제어용 DSP, 성안당, 2003
- [7] 김동원, 박귀태, "이족 휴머노이드 로봇의 안정적인 보행 패턴 분석: 퍼지 모델링 접근방법", 전기학회논문지, vol. 54D, no. 6, pp. 376-382, Jun, 2005.